

水平繰返し荷重下における砂中に設置されたスパイラル杭の水平抵抗挙動とその評価

九州大学大学院 学○WANG QIKAI

九州大学大学院 F 安福 規之 正 石藏 良平 正 ADEL ALLOWAISY

1. はじめに

近年、無排土や低コスト、工期短縮などの打ち込み杭の長所を生かしながら、施工に伴う騒音や振動の発生ならびに環境負荷の低減が期待されるスパイラル杭が開発されている。大型の太陽光発電パネルを支えるための杭形式として、このスパイラル杭の可能性について地盤工学的視点から鉛直・水平支持力に関する検討を進めている¹⁻²⁾。本報では、砂地盤を対象に繰返し水平載荷実験を行い、スパイラル杭の水平抵抗挙動をプレート状の杭と対比させながら、その評価手法を提案する。

2. 実験概要

2.1 実験装置と模型杭

本実験に使用した実験装置は図1に示す通り、砂地盤タンク、シリンダー、模型杭、変位計、ロードセルから構成されている。砂地盤タンクは、内径750mm、深さ500mmの円筒形であり、地盤材料には表1に示す熊本珪砂7号を使用した。模型地盤は珪砂の乾燥地盤とし、所定の相対密度になるように乾燥砂を4層にわけて投入し作製する。2層目が完了した後、杭頭回転自由という条件で載荷装置先端に模型杭を取付け、表層まで砂投入と締め固め作業を繰返し行う。模型杭は図2に示す通り、鋼製のスパイラル杭とプレート杭である。スパイラル杭はプレート杭を長軸まわりに捻り加工をする簡単な棒材で、載荷装置との取付け部とスパイラル部(216mm)で構成されている。模型杭の縮尺は、実大杭の材料と地盤タンクの大きさを考慮して設定した。模型杭と実大杭のパラメータを表2に示す。なお、相似則として、 $(I_m \cdot E_m)/(I_p \cdot E_p) = 1/F^{4.5}$ の式³⁾を満たしている (I_m, I_p :模型/実大杭の断面2次モーメント、 E_m, E_p :模型/実大杭のヤング率、 F :縮尺)。また図2に赤線で示すように、本実験はピッチ・幅比4.5のスパイラル模型杭を用いた。

2.2 実験方法

実験は、変位制御で実施され、杭径20%の変位振幅で杭頭に対して50回正負交番載荷する。これはBromsの理論⁴⁾より、杭径20%変位での支持力を杭の水平極限支持力として評価することを参照した。相対密度は60%,75%,90%、載荷速度は20s(0.64mm/s),30s(0.43mm/s),60s(0.21mm/s)という異なる杭頭変位周期を選定した。特に海陸風などの影響を受けている構造物基礎の水平変位挙動はこの周期範囲で表現できることが知られている⁵⁾。

2.3 結果と考察

図3は、模型実験で得られた一連の杭頭荷重と地盤表面での杭変位関係をまとめたものである。この図3の結果より、1)相対密度と載荷速度の増加に伴い、杭頭荷重と水平変位の履歴に差が見られること、2)スパイラル杭はプレート杭に比べて、特に相対密度が大きくなるほど同変位での杭頭水平抵抗力が向上することがわかった。図4(a-c)に繰返し回数、相対密度、載荷速度と平均水平極限支持力関係を示す。ここで、平均水平極限支持力は各繰返し回数の

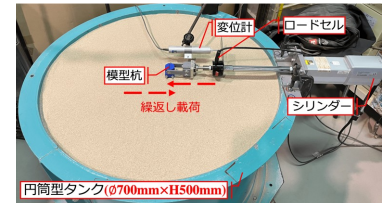


図1 載荷実験装置

表1 熊本珪砂7号の物性

土粒子比重 G_s	2.62
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	1.58g/cm ³
最小乾燥密度 ρ_{dmin}	1.21g/cm ³
内部摩擦角	38°(Dr=80%)

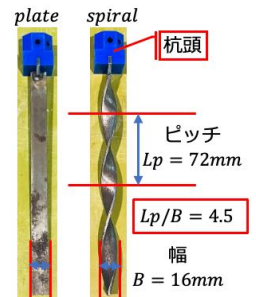


図2 模型杭(載荷方向撮影)

表2 模型杭と実大杭のパラメータ

	模型杭	実大杭
材料	鋼	铸铁
$EI(kN \cdot m^2)$	0.20	6476.34
長さ $L(m)$	0.216	3
幅 $B(m)$	0.016	0.22
肉厚 $T(m)$	0.003	0.04
縮尺 F	1	10

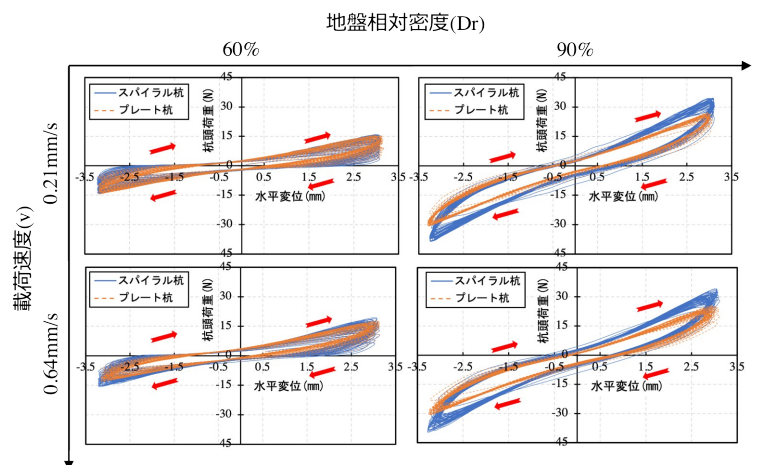


図3 杭頭荷重と地盤表面での杭変位関係

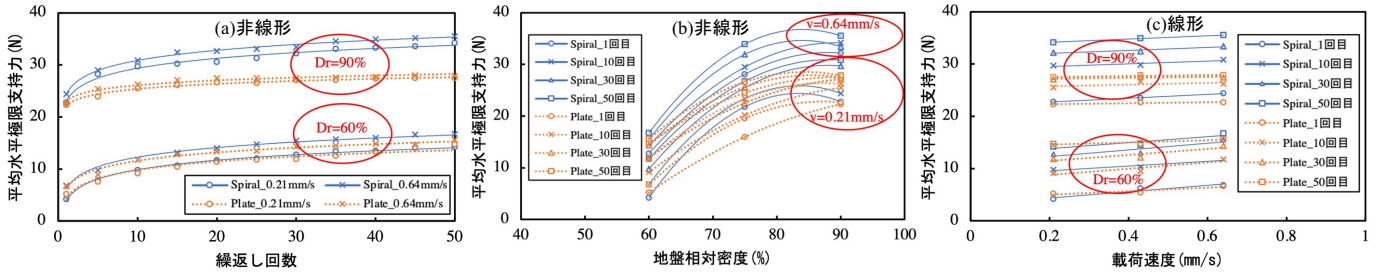


図 4(a-c) 繰返し回数、地盤相対密度、载荷速度と平均水平極限支持力関係

± 0.2B(B: 杭径)変位における杭頭荷重の平均値とする。図 4(a-c)から、1) スパイラル杭とプレート杭共に、支持力の増加の割合は、相対密度に関わらず繰返し回数の少ない段階で大きく、繰返し回数が増えるとともにその増加の割合は収束に向かう傾向にあること、2) 同じ繰返し回数、相対密度で支持力を比較した場合、総じてスパイラル杭のそれが大きくなっていること、3) 杭の形態に関わらず载荷速度の増加は水平支持力を大きくすることが特徴的なこととして読み取れる。

3. ベイズ推定を用いたスパイラル杭の水平極限支持力評価

繰返し水平载荷試験データを活用し、水平繰返し荷重を受けるスパイラル杭の水平極限支持力評価式について分析した。「繰返し回数 N 、杭頭変位周期 $T(s)$ 、地盤相対密度 $D_r(\%)$ 」を説明変数とし、「水平極限支持力 $F(N)$ 」を目的変数とする。図 4(a-c)から得られた知見を加えて、説明関数は $f, N^\alpha, (D_r/90)^\gamma, \beta/(T/1280)$ という 4 つの部分で構成されている。ここで、 α, β, γ はモデルパラメータであり、 $f(N)$ は Jugdernamjil ら²⁾による水平単調荷重下の水平極限支持力推定値である。また、 $(D_r/90)^\gamma$ の分母にある 90%は相対密度であり、 $1280\beta/T$ の分子にある 1280s は杭頭変位周期である。これらの数値は Jugdernamjil らの実験条件に合わせて設定している。また、説明関数について式 (1~3)に示すように 3 種類のモデル構成パターンを考えた。これは水平単調荷重下の水平極限支持力推定式の拡張として、 $N^\alpha, (D_r/90)^\gamma, \beta/(T/1280)$ の組み合わせという想定で繰返し回数、杭頭変位周期、地盤相対密度の変化による支持力への影響を反映する式として与えたものである。

$$F = f \times (N^\alpha + \beta/(T/1280)) \times (D_r/90)^\gamma \quad (1) \quad F = f \times (N^\alpha + \beta/(T/1280) + (D_r/90)^\gamma) \quad (2)$$

$$F = f \times (N^\alpha) \times (\beta/(T/1280)) \times (D_r/90)^\gamma \quad (3)$$

水平極限支持力評価モデルを構築する際は、最近よく注目されているベイズ推定を用いてパラメータの推定を試みた。ベイズ推定は全てのパラメータを確率変数として扱うため、推定結果は確率分布として表現される。推定結果の確率分布から期待値を採取し、モデルパラメータを決定する。水平極限支持力の実測値と理論値を比較することによりモデル精度の検証を行った。その結果を表 3、図 5 に示した。水平極限支持力の実測値と、式(1)から求められた理論値は強い正の相関関係があり、妥当なモデルが得られていると考えられる。

4. おわりに

本研究では、砂地盤の相対密度と水平载荷速度に着目して、スパイラル杭とプレート杭の繰返し水平载荷挙動を比較検討した。その結果、特に相対密度が大きくなるほどスパイラル杭はプレート杭に比べて繰返し水平载荷時の水平抵抗力が向上することがわかった。± 0.2B(B: 杭径)の水平変位を繰返し与えた場合、スパイラル杭とプレート杭の水平極限支持力は、繰返し回数、相対密度の増加と共に非線形的に増加した。また、载荷速度が速くなるほど水平極限支持力は線形的に増加することがわかった。加えて、ベイズ推定の手法を用いて水平繰返し荷重を受けるスパイラル杭の水平極限支持力評価モデルを提案し、その評価精度について検証した。

謝辞:本研究を進めるに当たり、ヒノデホールディングス株式会社の黒川貴大氏、井手裕太氏の御協力を頂いた。ここに、心より感謝の気持ちを申し上げる。

参考文献

1)Wang K., Tani Y., Yasufuku N., Ishikura R., Fujimoto H., Nagata M., (2019). Bearing capacity characteristics of spiral pile in sandy ground focused on pitch-width ratio. The 54th Geotechnical Research Presentation, No.0627. 2)Jugdernamjil A., Yasufuku N., Tsamba T., (2021). Ultimate Lateral Capacity of Rigid Spiral Pile under Monotonic Loading in Dense Sandy Soil. The 31st International Ocean and Polar Engineering Conference, 1-21-2162. 3)Wood, D. M., Crewe, A., & Taylor, C. (2002). Shaking table testing of geotechnical models. Int. J. Phys. Model. Geo-tech: 2(1). 1-13. 4)Broms, B. (1964). Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soil. J.S.M.F.D., ASCE, 123-156. 5)Natarajan, M., Mohan, K. and Balasubramanian, T. (2015): Waves and tides. Centre of Advanced Study in Marine Biology, Diana Morales, pp.32-44.

表 3 評価モデルの相関係数

	相関係数
式(1)	0.927
式(2)	0.739
式(3)	0.625

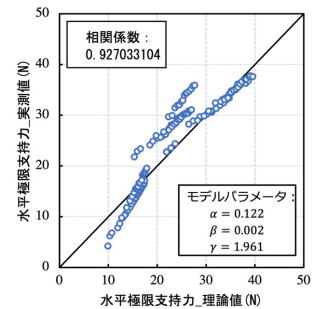


図 5 式(1)の評価精度検証